

ITER 磁体馈线冷屏的初步设计

王建青, 武松涛, 宋云涛, 张远斌

(中国科学院 等离子体物理研究所, 安徽 合肥 230031)

摘 要: 国际热核聚变实验反应堆 ITER(International Thermonuclear Experimental Reactor) 是正在进行的一项大型国际合作项目。磁体馈线是保证磁体正常运行的重要通道, 冷屏是馈线的关键部件之一。对磁体馈线内部冷屏进行了初步的结构设计和热负荷计算。

关键词: 磁体馈线; 冷屏; 热负荷

中图分类号: TL631.2*4

文献标识码: A

文章编号: 1006-7086(2005)04-0243-04

PRELIMINARY DESIGN OF THERMAL SHIELD FOR ITER MAGNETIC FEEDER

WANG Jian-qing, WU Song-tao, SONG Yun-tao, ZHANG Yuan-bin

(Institute of Plasma Physics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

Abstract: International Thermonuclear Experimental Reactor (ITER) is an unprecedented International collaboration program. Magnet feeders are the channels that ensure the normal operation of magnet. The thermal shields are the key components of feeders. The preliminary structures of thermal shield have been designed. The thermal load has been calculated.

Key words: magnetic feeder; thermal shield; thermal load

1 引言

国际热核聚变实验反应堆(ITER)是目前正在进行的大型国际合作项目, 它的目的是建造一个超大型超导托卡马克, 从科学和技术的角度展示和平利用核能的可能性^[1]。磁体系统是整个装置的关键部件之一, 完全采用 CICC 超导铠装电缆导体。馈线系统是磁体进行供电、冷却、失超诊断等的通道, 主要由杜瓦内部馈线、过渡馈线(Cryostat Feedthrough, CF)、线圈终端盒(Coil Terminal Boxes, CTB)等组成(见图 1)。杜瓦内部馈线位于杜瓦内, 与磁体终端相连。过渡馈线穿过杜瓦壁, 与线圈终端盒相连, 其内部与杜瓦相通, 所以没有单独的真空系统。过渡馈线内部的超导电流传输线和氮管有用于吸纳磁体位移和热收缩量的 S 形弯曲结构, 相应的过渡馈线有直线段和用于容纳弯曲段的箱体结构。线圈终端盒与过渡馈线之间设有真空隔断, 内部包括由室温到低温的过渡结构——电流引线, 为单独的真空系统。正常运行时超导电流传输线、氮管、电流引线低温端工作温度为 4.5 K。为降低温度梯度, 因而要求在室温和 4.5 K 之间设

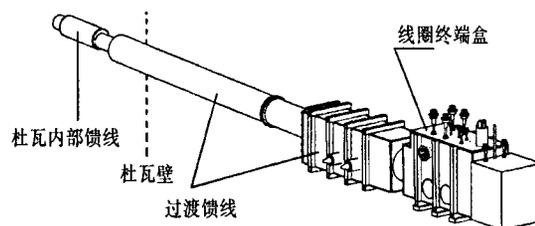


图 1 磁体馈线系统

收稿日期: 2005-07-11.

基金项目: 国际科技合作重点项目计划(基础研究部分)项目基金资助(2004CB720704)。

作者简介: 王建青(1973-), 女, 山西省寿阳县人, 博士生, 从事 ITER 磁体馈线的设计与分析研究。

置冷屏。

2 馈线冷屏工作原理

磁体正常运行时,超导电流传输线、冷却管的工作温度为 4.5 K。为保证这一工作温度,必须尽可能减少周围室温壳体结构对电流传输线和冷却管等的热辐射,以降低 4.5 K 温区的热负荷。不同温区物体之间的辐射传热近似公式为^[2]

$$Q = \frac{F_1 \cdot \sigma \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right]}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{F_1}{F_2} \left(\frac{1}{\varepsilon_2} - 1 \right)} \quad (1)$$

式中 Q 为热流量(W); F_1 、 F_2 分别为热、冷壁表面积; T_1 、 T_2 分别为热、冷壁温度; ε_1 、 ε_2 分别为热、冷壁表面辐射系数; σ 为斯蒂芬 - 波尔兹曼常数,取值为 $5.67 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$ 。可见降低热壁温度 T_1 是减少辐射传热、降低冷壁端热负荷的最有效的措施。过渡馈线的直线部分和 S 弯盒内部、CTB 盒内部都采用了在室温馈线和电流传输线、冷却管的保护内管之间增加 80 K 的低温屏蔽层的结构,从而有效地减少了 4.5 K 温区的热负荷。

3 冷屏的结构设计

3.1 设计参数^[3]

所有冷屏入口温度都是 80 K、1.8 MPa 的冷氦气,出口压力 1.7 MPa,温度上升 20 ~ 50 K 之间。氦质量流 3.5 kg/s。

3.2 材料选择

冷屏及其辅助部件主要采用玻璃环氧绝缘材料,如 G10 和 304L 不锈钢(UNS S30403)。304 常用于易腐蚀焊接件,是一种辅助无磁低温钢。其他可以考虑的材料有 316 不锈钢和铜镍合金,但 316 不锈钢价格比 304 贵很多,而 304 完全能够满足应力要求。铜镍合金的热传导率是不锈钢的 4 倍,电阻是不锈钢的 1/4。因此,如果采用铜镍合金,厚度只需不锈钢的 1/4 就可以满足所有的性能要求,但成本却是 304 的 4 倍,且采用这种材料的薄板必须加设加强筋,使得结构复杂。

3.3 冷却管设计

3.3.1 尺寸计算

根据 ITER 馈线设计规范提供的冷却管尺寸计算公式

$$\frac{dp}{dx} = -2f \frac{m^2}{\rho D_h A^2} \quad (2)$$

其中,流程阻力系数为

$$f = \frac{0.046 \times N}{Re^{0.2}} \quad (Re > 2300) \quad (3)$$

$$f = \frac{64}{Re} \quad (Re > 2300) \quad (4)$$

雷诺数

$$Re = \frac{4m}{vP_e} \quad (5)$$

式中 p 为压力; x 为冷却管长度; D_h 为水力直径; m 为质量流速; A 为流体截面积; ρ 为氦气密度; v 为动力黏度; P_e 为湿周。

已知冷却管出入口压差为 0.1 MPa,冷却管长度约为 44.5 m,计算的冷却管内径为 0.006 3 m。管径初步取 8 mm,壁厚初步取 2 mm。

采用较大直径管的主要原因是考虑满足 0.1 MPa 压力降的要求。要求所有管都符合 ISO 标准或国标。

为了便于冷却管与屏蔽板之间的焊接,建议采用截面为 8 mm × 8 mm 的方管,壁厚取 2 mm。

3.3.2 排列要求

由于热负荷对温度非常敏感,冷却管沿屏蔽板表面蛇行排列;冷却管间距离不超过 500mm;满足压力降要求;屏蔽板厚度给定时,冷却管之间距离取决于屏蔽板最高温度时需低于指定的最大值。

如果冷屏冷却不足,可能导致冷部件温度上升,影响超导馈线的稳定性。因此,冷屏冷却系统要求足够的裕量,这一点在冷却管的布置上应加以考虑。条件允许的话,最好布置两套冷却管路,一套作为备用。

3.4 屏蔽板设计

ITER 装置冷屏的屏蔽板主要采用 2.0 mm 厚的不锈钢和 0.5 mm 厚的铜覆层构成的双金属结构板。这种设计利用了铜的良好的导热性,对冷却管起到了热分流的作用。缺点是不锈钢和铜的热收缩和膨胀系数不同,易产生双金属效应,导致屏蔽板出现大的变形和应力,而且双金属结构成本较高。另外由于铜在低温下的电阻很小,为减小涡流,铜覆层结构必须进行电绝缘。和 ITER 冷屏相比,馈线内部冷屏结构尺寸要小很多,工作环境也相对要简单。参考 EAST 冷屏设计,馈线冷屏采用双层不锈钢板作为屏蔽板,冷却管位于双层板之间。

某些部位,如 S 弯盒内部冷屏与其他部件相连的侧端面,受位置、面积限制,不易焊接冷却管,所以这些部位采用单一的屏蔽板,不考虑冷却管。对这些部位,要求适当加厚屏蔽板厚度。

3.5 表面处理

降低屏蔽板暴露表面的有效吸收率或发射率,对减少屏蔽板热负荷和允许屏蔽板较薄或冷却管间距增大是必要的。用来降低表面辐射率的方法有表面镀层(如镀银)、多层绝热等。

表面镀层比较坚固,真空性能好。同其他低温负荷相比,其热负荷相当低。镀层材料可以是金或银。与金相比,银的吸收率和辐射率更低,特别是在红外线范围内(通过实验测量在 77 K,相对 300 K)时银的辐射率是 0.008 ~ 0.017,金是 0.010 ~ 0.025),而且,银较便宜。

多层绝热是利用多层金属箔层间多次辐射换热的方式进行绝热。箔层厚约 0.01 ~ 0.05 mm,箔层之间采用质轻且导热系数小的材料(如玻璃纤维布)作分隔层,绝热层中要求抽真空。多层绝热的当量导热阻力是常温下空气的几百倍,有超级绝热材料之称^[3]。但多层绝热具有占用空间大、抽真空困难等缺点。

为了使室温表面对 80 K 冷屏表面以及 80 K 对 4 K 表面的热负荷最小化,根据不同的空间位置尺寸和热负荷要求,对馈线冷屏双层屏蔽板分别进行镀银或多层绝热处理。

3.6 冷却管与屏蔽板的连接

采用钨极电弧惰性气体保护焊(TIG)。焊接是最可靠的、便宜的、便于制造的冷却管和屏蔽板的连接方法。钨极电弧惰性气体保护焊只需局部加热构件,具有高强度、高可靠性、易维护、低成本和辅助加工设备最少等优点,缺点是焊接残余应力较大,焊后需要进行适当的热处理。铜钎焊尽管相当简单,但是高质量的铜钎焊要求管和屏蔽板整体加热到 900 °C,成本很高。另外,高质量的铜钎焊要求某一冷却区域是可见的,而且,采用铜钎焊需要辅助的专门装置,如熔炉、真空室等。

3.7 其他要求

冷却管与低温泵的连接通过法兰及螺栓连接。在冷屏的关键部位上设置测温元件,用以测量冷屏的实际工作温度。为防止电荷聚积,特别是对于 TF 磁体和其馈线而言,要求冷屏接地。

图 2 为 CF 冷屏示意图。从图中可以看出,CF 的冷屏包括直线段部分和馈线热收缩盒部分。为保证刚度,冷屏采用双层屏蔽板加冷却管结构。直线段屏蔽板要求镀银处理。馈线热收缩盒为长方形,外屏蔽板面向室温部件侧采用多层绝热处理。直线段与圆柱段相焊接,内部与杜瓦相通。冷却管道的布置主要考虑保证两管道间的最高温度在允许范围之内,同时兼顾刚度的要求。

CTB 有单独的真空系统,冷屏近似为长方形,要求

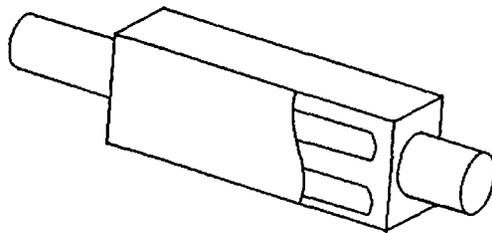


图 2 CF 冷屏示意图

双层屏蔽板的辐射面均进行多层绝热处理。

4 冷屏热负荷计算

在正常真空状态时,漏热主要由热辐射、残余气体热传导等产生。杜瓦内的高真空使得气体传导分子热最小化。

过渡馈线与 ITER 外真空杜瓦直接相通,其真空环境为杜瓦真空(真空度为 0.013 Pa),可忽略内部气体的对流热。因此,冷屏的热负荷主要是过渡馈线外壳内表面对冷氦气系统的辐射热。

外界对冷氦气系统的辐射热即室温(300 K)对 80 K 的热辐射。经计算,过渡馈线外壳内表面积 F_1 约为 54.07 m²,冷屏表面积 F_2 约为 50.70 m²。材料表面辐射系数由材料的种类、表面加工工艺及表面温度、表面结霜或结露情况决定。过渡馈线外壳的材料为 304 不锈钢,室温时辐射系数约为 0.08,80 K 时辐射系数为 0.02。多层绝热箔层为铝箔,80 K 时辐射系数为 0.018。银镀层 80 K 时辐射系数为 0.083。将数值代入(1),计算出辐射热量约为 12.8 W。

同理求得 CTB 冷屏的辐射热负荷为 50.0 W。CTB 冷屏内部包含有电流引线。电流引线的一段与 4.5 K 超导电流传输线相连,另一端与室温电源相连,温度梯度很大,是整个装置的主要热负荷部位,所以对 CTB 内冷屏的影响很大,使得 CTB 冷屏所受热负荷远大于 CF 冷屏所受热负荷。

5 结束语

作者对 ITER 馈线冷屏进行了初步的结构设计,完成了其热负荷的理论计算。今后将从有限元的角度对冷屏进行热分析,以便找到保持适当温度分布的、带冷却管道的、低温屏蔽板的最佳形状和低温运作方案,并确定支撑合适的位置,从而验证冷屏结构的合理性与可靠性。

参考文献:

- [1] Aymar R. Status of ITER. Fusion Engineering and Design[J], 2002, 61-62:5~12.
- [2] 俞佐平,陆煜. 传热学(第3版)[M]. 北京:高等教育出版社,1995.
- [3] 杨世铭,陶文铨. 传热学(第三版)[M]. 北京:高等教育出版社,1998.

新书预告

《真空技术》丛书开始编写

以全国政协副主席宋健院士为名誉主任委员、达道安研究员为主编、兰州物理研究所所长邱家稳研究员和东北大学杨乃恒教授为副主编编著的《真空技术》丛书已开始编写。

全书共分十五册,依次为真空技术的基础、真空泵、真空计量学、真空材料、真空装置、超高真空、真空检漏技术、真空蒸馏、真空干燥、真空镀膜、真空冶金、真空工业、空间真空科学、空间环境学、真空技术常用数据表等。全书预计 500 万字左右。

由北京国防工业出版社负责出版,预计 2006 年陆续发行。丛书将突出近代技术进步,在全面、历史、系统地综合真空科学技术发展的基础上,着重实用的理论及技术,重点描写最新发展起来的先进的、实用性强、应用广泛的新技术;着重系统性,强调实用性。力求反映当代真空技术的新水平。

丛书编委会由全国真空学术界著名教授、学者 27 人组成。作者都是长期从事真空科学技术研究、曾编著过真空专著的专家,他们以极大的热情投入丛书编写。我们坚信这套《真空技术》丛书出版将会推动我国真空技术发展。我们真诚地欢迎全国广大从事真空科学技术的专家、教授、工程技术人员积极参加这项工作,多提出宝贵意见、建议。对此《真空技术》丛书编委会深表衷心感谢。

本丛书编委会通讯地址:兰州 94 号信箱(730000)、渭源路 97 号《真空技术》丛书编委会。电话:0931-4585248(办)、4585358(办),电传:0931-8265391,联系人:达道安、谈治信、曹艳秋。

(供稿人:谈治信)